



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

METHODS OF TECHNICAL DIAGNOSTICS

METODY BEZDEMONTÁŽNÍ DIAGNOSTIKY

ZKRÁCENÉ ZNĚNÍ DOKTORSKÉ PRÁCE

AUTOR PRÁCE

Ing. Stanislav Klusáček

ŠKOLITEL

doc. Ing. Ludvík Bejček, CSc.

OPONENTI

Prof. Ing. Stanislav Ďaďo, DrSc.

doc. Ing. Zdeněk Němec, CSc.

Prof. Ing. Jiří Tůma, CSc.

OBOR

Kybernetika, automatizace a měření

DATUM OBHAJOBY

30.8.2012

KEYWORDS

Technical diagnostics, condition monitoring, sensor self-diagnostic, vibration, accelerometer, piezoelectric sensor, knock sensor, calibration, piezoceramic, cracks, microcracks, impedance measurement, frequency response

KLÍČOVÁ SLOVA

Technická diagnostika, bezdemontážní diagnostika, diagnostika senzoru, vibrace, akcelerometr, piezoelektrický snímač, snímač klepání, kalibrace, piezokeramika, trhliny, mikrotrhliny, měření impedance, frekvenční charakteristika

THE DISSERTATION THESIS IS AT ONE'S PROPOSAL:

Brno University of Technology
Faculty of Electrical Engineering and Communication
Department of Research and Foreign Relations
Technická 3058/10
616 00 Brno
Czech Republic

© Stanislav Klusáček, 2012

ISBN

ISSN

CONTENT

| | |
|---|----|
| 1 ÚVOD..... | 4 |
| 1.1 Zaměření disertační práce | 4 |
| 1.2 Obsah disertační práce | 5 |
| 1.3 Přínosy disertační práce | 6 |
| 2 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE..... | 6 |
| 3 ŘEŠENÍ DÍLČÍCH CÍLŮ DISERTACE | 7 |
| 3.1 Vývoj prototypu senzoru klepání a metody jeho kalibrace..... | 7 |
| 3.1.1 <i>Specifikace parametrů senzoru</i> | 7 |
| 3.1.2 <i>Kalibrace snímače porovnáním s referenčním snímačem</i> | 8 |
| 3.1.3 <i>Výsledky návrhu prototypu snímače klepání</i> | 9 |
| 3.2 Porovnání a vyhodnocení metod pro bezdemontážní diagnostiku elektrických parametrů senzorů vibrací..... | 9 |
| 3.2.1 <i>Měření impedance a rezonančních kmitočtů</i> | 9 |
| 3.2.2 <i>Přímé měření frekvenční charakteristiky frekvenčním analyzátozem</i> | 12 |
| 3.2.3 <i>Měření frekvenční charakteristiky pomocí elektrického impulsu</i> | 12 |
| 3.2.4 <i>Sledování vlivu rozsahu poškození trhlinami na chování piezokeramiky</i> | 15 |
| 3.2.6 <i>Vliv trhlin na impedanční charakteristiku</i> | 15 |
| 3.2.7 <i>Vliv trhlin na měření pomocí frekvenčního analyzátoru</i> | 22 |
| 3.2.8 <i>Vliv trhlin při měření metodou elektrického pulsu</i> | 23 |
| 3.3 Shrnutí použitých metod a doporučení | 24 |
| 3.3.1 <i>Metoda měření impedanční charakteristiky</i> | 24 |
| 3.3.2 <i>Metoda měření pomocí frekvenčního analyzátoru</i> | 24 |
| 3.3.3 <i>Metoda měření pomocí elektrického pulsu</i> | 25 |
| 4 ZÁVĚR..... | 26 |
| REFERENCES | 27 |
| AUTHOR'S CURRICULUM VITAE | 30 |
| ABSTRACT | 32 |
| ABSTRAKT | 32 |

1 ÚVOD

Technická diagnostika a monitorování stavu technických zařízení je velmi aktuální u všech průmyslových procesů. Během posledních desetiletí se používaly různé prostředky odpovídající technickým možnostem doby. Dnes má diagnostika zcela nezastupitelnou roli v celé oblasti techniky a je v podstatě mezioborovou vědní disciplínou.

Dnešní moderní systémy a prostředky pro diagnostiku či monitorování stavu zařízení se skládají z mnoha specifických senzorů, systémů pro sběr dat a spolu

s počítačovými programy zpracovávají a analyzují signály pro různé účely. Příkladem mohou být robustní on-line systémy pro monitorování a prediktivní údržbu strojů, které se používají pro rozpoznání blížících se problémů u celé řady strojních zařízení (např. hřídelí, ložisek, celých motorů atp.) a umožňují udržovat stroje v optimálním pracovním stavu, plánovat pravidelnou údržbu nebo včas odhalit poruchu, což může mít nezanedbatelný ekonomický přínos.

Speciálně monitorování vibrací a vibrační diagnostika strojů a zařízení získaly v posledních letech mimořádný význam, jelikož jsou přístroje na měření vibrací cenově dostupné, monitorují i střední a malé stroje. Proto je čím dál více kladen důraz na kvalitu signálu ze snímačů vibrací. Požadavky kladené dnes na snímače obecně a „inteligenci“ snímačů jsou velmi široké. Inteligentní snímače (Smart sensors / Intelligent sensors) obsahují celou škálu funkcí jako např. programovatelné zesílení, linearizaci, filtraci a normalizaci měřeného signálu, možnost automatické korekce vlivu parazitních veličin, pokročilé metody potlačení šumu a verifikace platnosti naměřených dat, autokalibrace a autodiagnostika, statistické funkce, hlídání mezí, v neposlední řadě pak možnost přímého zapojení snímače do distribuovaných systémů pomocí vhodné digitální komunikační sběrnice a tedy schopné obousměrné číslicové komunikace s řídicím centrem. Tyto vlastnosti lze s výhodou použít a využít například u MEMS snímačů, ale samozřejmě existují i „klasické“ snímače, které lze „vybavit“ inteligencí.

Tato disertační práce popisuje metody bezdemontážní diagnostiky piezoelektrického senzoru – snímače klepání motoru, pomocí nichž by bylo následně možno sledovat stav snímače, tedy diagnostikovat provozní poruchu snímače.

1.1 ZAMĚŘENÍ DISERTAČNÍ PRÁCE

Sledování aktuálního provozního stavu jakéhokoli snímače hraje významnou roli pro udržování bezpečnosti měřeného, respektive sledovaného zařízení. Konstrukce sledovaných zařízení, ale i samotných snímačů jsou stále propracovanější. To umožňuje další a dokonalejší funkce, zároveň však to znamená vyšší složitost, vyšší pořizovací ceny strojů a vyšší ztráty v případě selhání. Proto i roste význam technické diagnostiky. S rostoucí složitostí a cenou strojů se zvyšuje význam spolehlivého určení příčiny a místa poruchy, detekce postupně narůstajícího poškození, prognózování vývoje technického stavu. Tyto činnosti nelze určit bez adekvátních informací ze snímačů a zároveň sledovat věrohodnost dat z těchto

snímačů ať již v důsledku závady či poruchy vlastního snímače. Proto je nutná i vlastní diagnostika snímače. Vývoj technické diagnostiky je proto směřován k permanentnímu automatickému monitorování technického stavu strojů a jejich hlavních částí, mezi které bezesporu patří snímače a metody jejich bezdemontážní diagnostiky.

Výše zmíněné platí i v případě řízení motoru v automobilu. Je třeba zajistit, aby naměřená data ze senzorů byla správná. To je ale problém v případě poškozeného snímače, který sice nějaké informace poskytuje, ale ty neodpovídají skutečnosti. Zde je nutné si uvědomit důležitost diagnostiky. Jedna možnost spočívá v demontáži a otestování samotného čidla. To však z mnoha důvodů není vždy vhodné a navíc se závada může identifikovat poměrně pozdě od vlastního poškození. Proto je třeba hledat metody řešení bezdemontážní diagnostiky senzorů, zejména takových, u kterých se sledují kritické parametry sloužící k řízení či bezpečnosti automobilu.

1.2 OBSAH DISERTAČNÍ PRÁCE

Myšlenka nalezení těchto metod vznikla při vývoji snímače klepání spalovacího motoru, hledání optimálních parametrů a hlavně posléze při řešení potenciálních výrobních technologických problémů tohoto senzoru, kdy se vyskytly potřeby bezdemontážních metod pro rychlou diagnostiku snímače a pro vyloučení chybných nebo poškozených snímačů. Při průzkumu existujících metod pro diagnostiku piezoelektrických snímačů, respektive metod pro bezdemontážní diagnostiku piezoelektrických snímačů, bylo v rámci rešerše zjištěno, že tato oblast není příliš řešena – popsána. A jelikož se tato problematika v kontextu vyvíjeného jevila velmi aktuální, začal jsem se touto problematikou aktivně zabývat.

Disertační práce se zabývá problematikou metod pro bezdemontážní diagnostiku piezoelektrických snímačů, konkrétně snímače klepání.

Práce je členěna do tří stěžejních částí:

První část popisuje teoretické a experimentální základy disertační práce a podává přehled o současném stavu řešené problematiky. Je zde popsán vývoj technické diagnostiky, popis diagnostických postupů, modelů, diagnostických měření včetně vzniku poruch a jejich příčin. Dále je blíže rozebrána vibrodiagnostika a zejména je uveden popis metod analýzy diagnostických signálů, které se aktuálně používají v technické diagnostice.

Část druhá popisuje vymezení dílčích cílů disertační práce a vlastní řešení těchto cílů. Cíle této práce jsou založeny na prototypu snímače klepání, na kterém se hledaly metody pro bezdemontážní ověřování jeho parametrů, respektive metod pro diagnostiku piezokeramiky těchto senzorů vibrací. Dalším řešeným problémem v disertační práci je diagnostika poruch a trhlin v piezokeramice snímače klepání a analýza jejich vlivu na změnu vlastností senzoru.

Část třetí se zabývá otázkami vyhodnocení zkoušených metod, diskuzí naměřených dat a jejich interpretace. V závěru jsou uvedeny perspektivy těchto metod a doporučení pro další možná pokračování řešené problematiky.

1.3 PŘÍNOSY DISERTAČNÍ PRÁCE

Přínos této disertační práce spatřuji v průzkumu a nalezení nástrojů - testovacích metod pro diagnostiku a sledování provozního stavu piezoelektrického senzoru. Přínos disertační práce lze shrnout takto:

- prezentace vývoje piezoelektrického snímače – snímače klepání
- nalezení metod pro bezdemontážní diagnostiku piezoelektrických snímačů, snímačů klepání
- ověření možnosti diagnostiky poruch, zejména trhlin v piezokeramice snímače metodami bezdemontážní diagnostiky a jejich případné další využití

2 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Zvyšování spolehlivosti měření v technické diagnostice úzce souvisí s kvalitou naměřených dat a tedy správnými údaji ze senzorů. Tyto údaje závisí na aktuálním „technickém stavu“ senzoru. V případě vibračních piezoelektrických senzorů, které monitorují stav mnoha často specifických strojních zařízení, například spalovacích motorů, znalost aktuálního stavu snímače a správnost jím měřených dat je přímo zásadní nejen kvůli bezpečnosti, ale také z ekonomických a ekologických důvodů. Existuje málo nových konstrukčních řešení a vhodných měřicích a vyhodnocovacích metod, které by bezdemontážním způsobem umožňovaly kontrolovat stav piezoelektrického senzoru. Z praktického hlediska je však mnohdy výhodné kontrolovat změnu technického stavu nejen v provozu, ale také například při výrobě těchto senzorů, přestože mluvit zde o „bezdemontážní“ diagnostice není zcela na místě. K bezdemontážním kontrolám stavu snímače nahrávají i pokročilá měřicí zařízení, která jsou do diagnostikovaných strojů ale i automobilů a letadel, dnes montována, tak aby jejich činnost byla maximálně bezporuchová a měla vliv na ekonomiku a ekologii.

Obecným cílem práce byla snaha přispět k tomu, aby pomocí „servisního“ měření bylo možné zjistit poruchu piezoelektrického snímače a jím měřených dat, respektive se co nejvíce přiblížit k standardnímu diagnostickému měření. To předpokládalo především nalézt metodu, která by se svou přesností a vypovídací schopností blížila postupům v metrologii a přitom byla přijatelně investičně i provozně náročná a tudíž dobře využitelná v běžné servisní praxi.

Na základě rešerše a rozboru byla snaha hledat takové metody, které by bylo možno použít s využitím výpočetních technik a umožnit v krátkém čase data nejen naměřit, ale také zpracovat a vyhodnotit. Výsledkem práce pak bylo mimo jiné ověření správnosti naměřených dat pomocí různých metod. Rozsáhlejší ověření a porovnání měření nebylo možno realizovat z časových důvodů, respektive dostupných měřicích prostředků v době řešení této práce. Ale byla snaha ve výsledcích a rozbořech ověřených metod upozornit na přednosti a nevýhody, které by bylo nutné/vhodné dále zpracovat a zvýšit tak přesnost těchto metod měření.

Dílčí cíle disertační práce a zároveň postup řešení byl následující:

- Realizace prototypu snímače klepání a metody ověřování jeho parametrů
 - Vývoj prototypu snímače klepání.
 - Kalibrace snímače porovnáním s referenčním snímačem.
- Hledání, porovnání a vyhodnocení metod pro testování parametrů snímače klepání a diagnostiku piezokeramiky snímače klepání
 - Měření impedance a rezonančních kmitočtů
 - Přímé měření frekvenční charakteristiky frekvenčním analyzátozem
 - Měření frekvenční charakteristiky pomocí elektrického pulsu
- Ověření metod pro diagnostiku poruch a trhlin v piezokeramice snímače klepání a jejich vliv na změnu vlastností senzoru
 - Vliv trhlin na impedanční charakteristiku
 - Vliv trhlin na měření pomocí frekvenčního analyzátoru
 - Vliv trhlin při buzení snímače pomocí vibračního stolku
 - Vliv trhlin při měření metodou elektrického pulsu

3 ŘEŠENÍ DÍLČÍCH CÍLŮ DISERTACE

3.1 VÝVOJ PROTOTYPU SENZORU KLEPÁNÍ A METODY JEHO KALIBRACE

Vývoj prototypu snímače klepání byl prováděn na základě poptávky firmy Hanhart Morkovice, respektive jejího hlavního odběratele Škoda Auto a měl splňovat normu koncernu Volkswagen AG normy TL 821 48 : 2001-08. Vývoj snímače klepání spočíval v alternativním návrhu snímače a jeho provedení s využitím technologického zázemí firmy Hanhart Morkovice. Volba konstrukce a parametrů vycházela z výše zmíněné normy TL 821 48 : 2001-08. Jako dodavatel piezokeramiky byla po oslovení celé řady výrobců piezokeramik po celém světě zvolena s ohledem na potřebné parametry a nabídnutou cenu (v kontextu předpokládaného odběru kusů) firma CeramTec AG a materiál Sonox P502, jehož parametry lze najít v katalogovém listě v [45].

3.1.1 Specifikace parametrů senzoru

Definované a požadované parametry dle normy TL 821 48 : 2001-08:

- citlivost senzoru klepání $30\text{mV/g} \pm 30\%$ ve frekvenčním pásmu 5 – 10 kHz
- linearita $\pm 15 \%$ z hodnoty citlivosti odečtené na 5 kHz ve frekvenčním pásmu 3 - 12 kHz
- Izolační odpor mezi vývody 1 a 2: $R_p \geq 5 \text{ M}\Omega$
- Kapacita: $C = 800\text{-}1600 \text{ pF}$

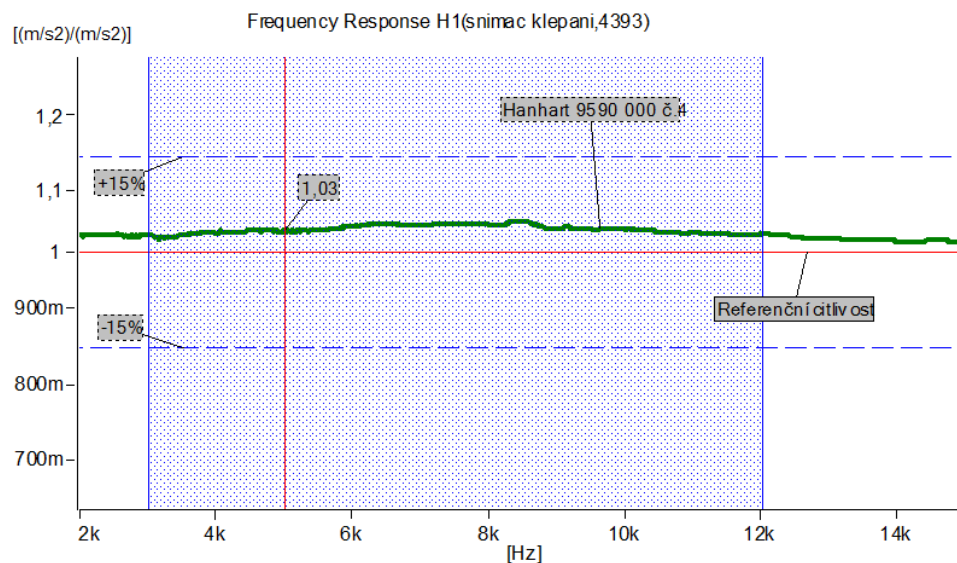
Tabulka 3-1 Výpočet hodnot tolerančního pole citlivosti senzoru klepání bez kabeláže

| | Citlivost [mV/g] | [m/s ²] | [(m/s ²)/(m/s ²)] | Frekvenční pásmo |
|---------------------|---------------------|---------------------|---|---------------------|
| Citlivost 30mV/G | 0,03 | 0,00306 | 0,967754423 | 5-10kHz |
| -30% | 0,021 | 0,00214 | 0,677428096 | |
| 30% | 0,039 | 0,00398 | 1,258080749 | |

Základní parametry zvoleného piezokeramického kroužku Sonox P502 dodacího listu výrobce:

- Kapacita $C=1100 \text{ pF} \pm 150 \text{ pF}$
- Elektromechanický vazební faktor $K_{\text{eff}} = 0,3275 \pm 0,0425$

V průběhu návrhu bylo třeba řešit celou řadu dílčích problémů a jejich vliv na výstupní parametry jako například použité konstrukční materiály, způsob uspořádání a uchycení piezokeramického kroužku, technologie výroby, atp.



Obrázek 3-1 Frekvenční charakteristika navrženého senzoru klepání

3.1.2 Kalibrace snímače porovnáním s referenčním snímačem

Parametry snímače klepání byly ověřovány na základě normy ČSN ISO 16063-21 - Kalibrace vibracemi porovnáním s referenčním snímačem. Jako referenční snímač (srovnávací etalon) byl použit akcelerometr Brüel&Kjaer (B&K) 4393, připojený přes nábojový zesilovač B&K 2647A na multianalýzátor PULSE 3560C. Celý řetězec byl kalibrován a navázán v Českém metrologickém institutu. Senzor klepání byl připojen taktéž přes nábojový zesilovač B&K 2647A na vstup multianalýzátoru. Oba snímače byly uchyceny na píst vibračního stolku B&K 4809, který byl

rozkmitáván pomocí výkonového zesilovače B&K 2706 rozmítaným harmonickým průběhem s konstantní amplitudou a frekvencí výchylky od 2 kHz do 15 kHz. Z naměřených amplitudových spekter byly vypočteny frekvenční charakteristiky měřených snímačů klepání. [56]

3.1.3 Výsledky návrhu prototypu snímače klepání

Z porovnání vypočtených hodnot tolerančního pole citlivosti senzoru klepání uvedených v tabulce 3-1 a příkladu charakteristiky na obrázku 3-1 je zřejmé splnění specifikace na citlivostní a frekvenční parametry, stejně tak byly splněny i další požadované parametry, tedy všechny parametry navrženého prototypu senzoru klepání byly plně srovnatelné s parametry komerčních snímačů firem Siemens a BOSCH a vyhovovaly požadavkům normy TL 821 48:2001-08. Zároveň navržené snímače klepání v počtu 200 kusů úspěšně prošly reálnými jízdními a provozními koncernovými zkouškami ve firmě Volkswagen AG v Německu.

3.2 POROVNÁNÍ A VYHODNOCENÍ METOD PRO BEZDEMONTÁŽNÍ DIAGNOSTIKU ELEKTRICKÝCH PARAMETRŮ SENZORŮ VIBRACÍ

3.2.1 Měření impedance a rezonančních kmitočtů

Piezokeramický prvek lze popsat náhradním elektrickým schématem. Náhradní elektrický obvod piezoelektrického prvku se z funkčního hlediska chová jako elektrický dvojpól, přesněji jako elektrický oscilační obvod. Jde o sériový rezonanční obvod přemostěný statickou kapacitou C_0 . [14]

Zjednodušený náhradní obvod má impedanci:

$$Z = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C_1} \quad (3-1)$$

Závislost změny impedance na frekvenci je vidět při tzv. sériové rezonanční frekvenci f_s , kdy impedance náhradního obvodu je ryze reálná.

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} \quad (3-2)$$

Při nižší frekvenci než je f_s je charakter impedance kapacitní, je-li frekvence vyšší než f_s je charakter impedance dvojpólu induktivní.

Často se používá ještě tzv. paralelní rezonanční frekvence, při níž je reaktance obvodu nekonečně velká.

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 \frac{C_1 \cdot C_0}{C_1 + C_0}}} \quad (3-3)$$

Ve skutečnosti se při měření rezonance používají další frekvence:

- f_r - rezonanční frekvence (odpovídá hodnotě kdy reaktance je nulová),
- f_a - antirezonanční frekvence (nulová reaktance),
- f_n - frekvence při které je absolutní hodnota impedance maximální,
- f_m - frekvence při které je absolutní hodnota impedance minimální,
- f_s - sériová rezonance,
- f_p - paralelní rezonance (bezeztrátová).

Za určitých zjednodušujících podmínek, např. v případě malého tlumení lze napsat, že $f_r = f_s = f_m$ a $f_a = f_p = f_n$ [12].

Při měření piezoelektrické keramiky se vyskytuje více rezonančních vrcholů. Na tomto průběhu je vidět reálná charakteristika samostatného piezokeramického prstence. Zde je patrné, že obsahuje více rezonančních módů. Výskyt dalších rezonančních kmitočtů je způsoben jednotlivými rezonančními módy piezoelementu, nebo vnější mechanickou částí, s níž je piezoelement spojen [34].

Ověření metody a výsledky měření

Základem provedených měření pomocí rezonanční metody je porovnání naměřené charakteristiky testovaného vzorku před a po poškození. Z toho plyne, že se jedná o destruktivní testování. Z výsledků teoretické rešerše vyplývá, že ke změnám v naměřených charakteristikách dochází zejména v rezonančních vrcholech a jejich okolí.

V katalogovém listu výrobce piezoelektrického prstence z keramiky Sonox P502 je uvedena hodnota kapacity $C^T = 1100 \text{ pF} \pm 150 \text{ pF}$, a koeficient elektromechanické vazby pro všechny typy kmitů $k_{eff} = 0,3275 \pm 0,0425$. K ověření těchto hodnot byl použit impedanční analyzátor Agilent 4294A a měřicí kleště Agilent 16334A. Naměřená hodnota kapacity na 1 kHz je rovna $C^T = 1104 \text{ pF} \pm 5 \%$, Koeficient elektromechanické vazby (rovnice 3-4) [42], je stanoven pro radiální kmity prstence pro $f_s = 49,2 \text{ kHz}$ a $f_p = 52,1 \text{ kHz}$, výsledné $k_{eff} = 0,3289 \pm 5 \%$.

$$k_{eff}^2 = \frac{f_p^2 - f_s^2}{f_p^2} k_{eff}^2 = \frac{f_p^2 - f_s^2}{f_p^2} k_{eff}^2 = \frac{f_p^2 - f_s^2}{f_p^2} \quad (3-4)$$

Orientační hodnota rezonanční frekvence pro radiální kmity prstence byla ověřena podle vztahu uvedeného v [14]

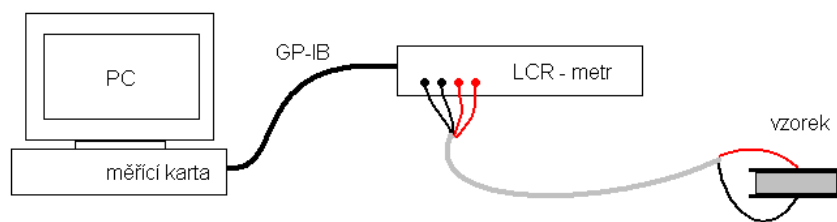
$$f_s = \frac{1}{2\pi r_s} \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (3-5)$$

$$r_s = \frac{1}{2}(r_e + r_i) \quad (3-6)$$

kde r_s značí aritmetický průměr z vnějšího r_e a vnitřního r_i poloměru prstence. E je Youngův modul pružnosti, tedy převrácená hodnota elastického koeficientu s_{ij} , a ρ je hustota použité piezokeramiky.

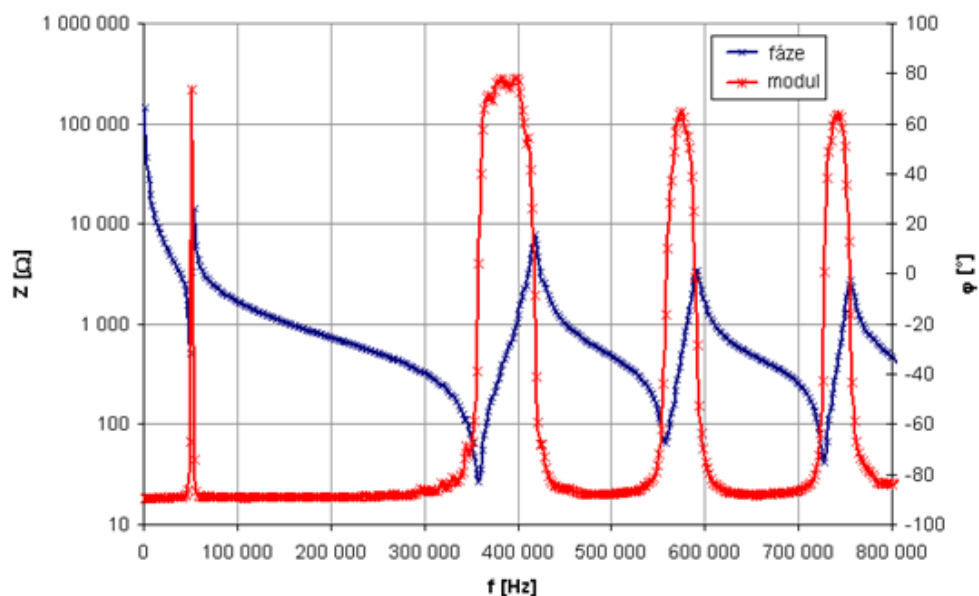
Pro orientační výpočet je možné využít katalogové hodnoty hustoty ρ (kg/m^3), a elatického koeficientu s_{ij}^E (m^2/N). Použitý prstenec z PZT keramiky Sonox P502 má poloměry $r_e = 0,02186/2$ m a $r_i = 0,01435/2$ m. Po dosazení vyšla hodnota rezonančního kmitočtu $46,5 \pm 5\%$ kHz, oproti naměřené hodnotě $49,2 \pm 5\%$ kHz. Menší chybu lze přisoudit odečítání z impedančního analyzátoru a zaokrouhlování ve výpočtu, a pouze přibližné hodnotě Yongova modulu.

Jelikož v laboratoři ale nebyl v počáteční fázi řešení k dispozici zmíněný impedanční analyzátor Agilent 4294A, bylo pro toto měření využito RLC metru HIOKI 3532 Z HiTESTER s nastavitelným měřicím kmitočtem. RLC metr byl připojen pomocí GPIB k osobnímu počítači. Celé měření bylo řízeno přes program v LabVIEW. Zapojení je vidět na obrázku 3-2.



Obrázek 3-2 Schéma zapojení pro měření impedanční charakteristiky

Z výsledků (obrázek 3-4) je vidět závislost modulu a fáze impedance na frekvenci. Zde jsou jasně patrné dílčí rezonanční frekvence a naměřená charakteristika dává jasnou představu o chování piezoelektrického prvku v daném frekvenčním pásmu.



Obrázek 3-3 Impedanční závislost samostatného nepoškozeného piezoelementu

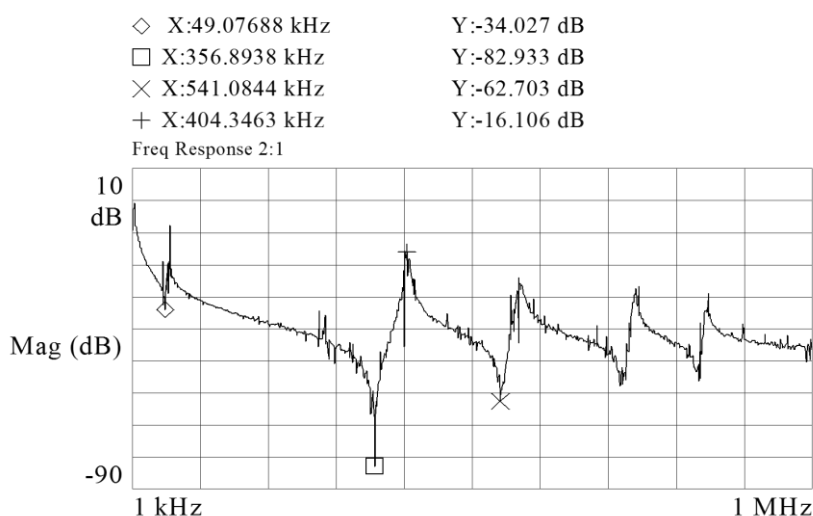
Po zakoupení impedančního analyzátoru Agilent 4294A bylo možno proměřit přesněji impedanční a fázové charakteristiky i pomocí tohoto přístroje viz závislosti na obrázcích 3-20, 3-21 a 3-22.

3.2.2 Přímé měření frekvenční charakteristiky frekvenčním analyzátozem

Další použitou metodou pro ověřování parametrů snímače klepání je zapojení na frekvenční analyzátor. Na vstupu měřícího obvodu je připojen generátor bílého šumu, který může být externí např. Agilent 33220A nebo interní, který je součástí frekvenčního analyzátoru HP89410A. Měřený piezoprvek je do obvodu připojen jako frekvenčně závislý dělič napětí. Připojeným analyzátozem se měří jak spektrum výstupního signálu, tak i vstupního (bílého šumu). Měřená charakteristika je pak získána jako frekvenční odezva, která je definována jako poměr výstupního frekvenčního spektra ke vstupnímu. Z naměřené charakteristiky je vidět chování piezokeramiky v závislosti na frekvenci.

Ověření metody a výsledky měření

Měření bylo prováděno na frekvenčním analyzátoru HP 89410A. Naměřené výsledky jsou na obrázku 3-5. Porovnáním s metodou měření impedanční charakteristiky je vidět, že naměřené rezonanční frekvence si odpovídají. Toto měření je ale v porovnání s předchozí metodou mnohem rychlejší. Touto metodou ale není možné určit hodnotu kapacity C^T a impedance, proto je pro další popis nutné využít další měřící zařízení např. RLC metr.



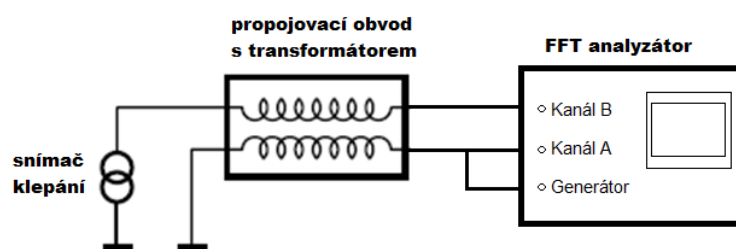
Obrázek 3-4 Frekvenční závislost nepoškozené piezokeramiky z HP 89410A

3.2.3 Měření frekvenční charakteristiky pomocí elektrického impulsu

Princip metody je následující. Krátký elektrický impuls z napěťového generátoru analyzátoru je použit jako testovací budící signál. Impuls je přiveden do snímače přes připojovací obvod s transformátorem, který odděluje signál buzení a signál odezvy a potlačuje vazbu mezi vstupním signálem a signálem odezvy. Odezva signálu ze snímače, který se chová jako generátor proudu, se měří v druhém kanálu, viz obrázek 3-6. Budící signál je použit pro výpočet odezvy spektra ze snímače klepání. Frekvenční charakteristika se vypočítá jako poměr mezi

měřeným spektrem ze snímače klepání a spektrem z generátoru analyzátoru. [5], [15], [36], [37]

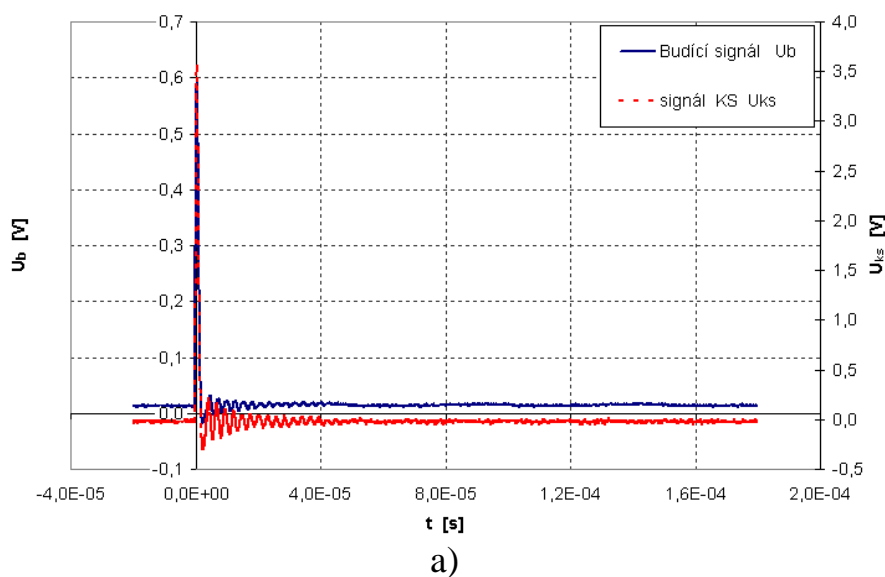
Zkušebním signálem je impuls, který má většinou obdélníkový průběh. To zajišťuje, že energie signálu je soustředěna zejména ve vyšších frekvencích, než v stejnosměrné složce. Při použití kmitočtového rozsahu 25 kHz je vhodné zvolit trvání pulsu tak, aby maximum energie bylo uprostřed frekvenčního rozsahu od 5 kHz do 20 kHz. Jestliže kmitočtový rozsah zvětšíme/snížíme, trvání pulsu se musí snížit/zvýšit.

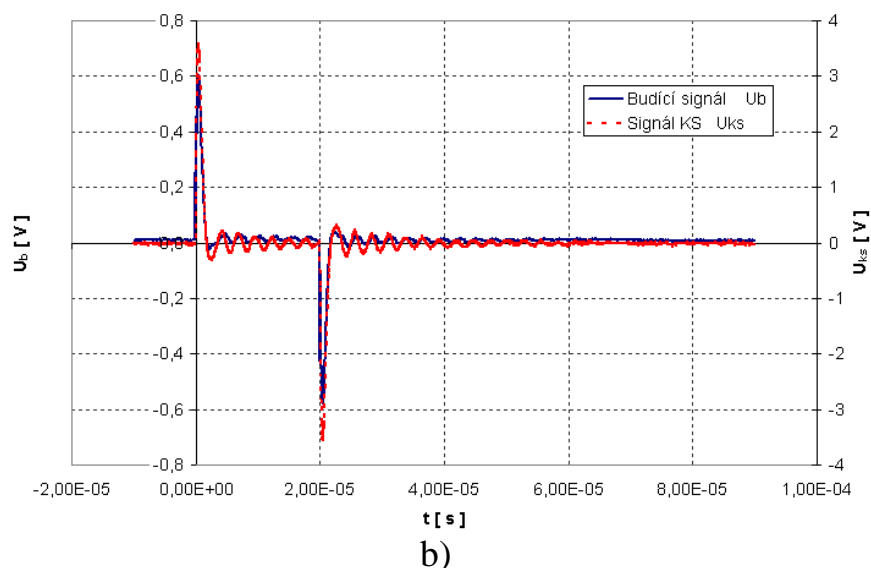


Obrázek 3-5 Zapojení pro testování senzoru klepání

Ověření metody a výsledky měření

Pro měření byl použit frekvenční analyzátor HP 89410A. Zapojení bylo provedeno dle obrázku 3-6. Jako budicí signál z generátoru byly zkoušeny obdélníkové pulsy o délce trvání 20 μ s a 100 ms a amplitudě 500 mV. Přivedením na vstup transformátoru došlo k jeho deformaci (vznikly dvě špičky). To může mít vliv na naměřenou charakteristiku. Porovnání časových průběhů z generátoru je na obrázku 3-7. Zde jsou jasně patrné dva impulsy, které vzniknou připojením na vstup transformátoru. [50]

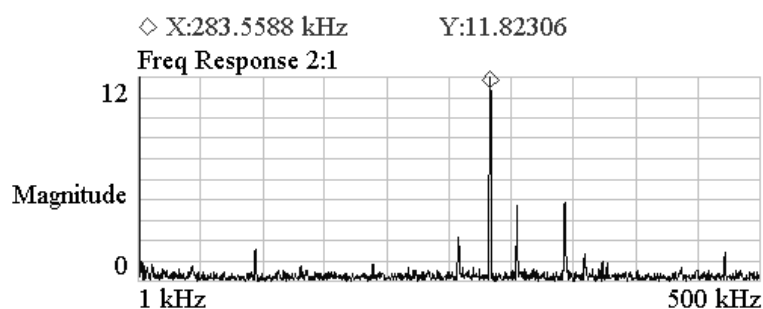




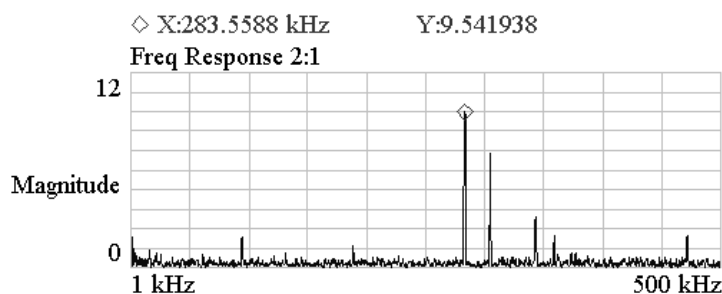
Obrázek 3-6 Časový průběh budícího signálu a odezvy snímače klepání
a) puls 100 ms b) puls 20 μ s

Naměřená frekvenční charakteristika je na obrázku 3-8. Měření se nepodařilo zrealizovat tak, aby naměřená data byla získána pomocí jediného pulsu. Pro získání čitelného výsledku bylo nutno využít průměrování, to znamená použití periodicky se opakujícího signálu. Frekvence opakování byla 1 Hz.

a) Puls 20 μ s



b) Puls 100 ms



Obrázek 3-7 Naměřené frekvenční charakteristiky pulsní metodou
a) puls 100 ms b) puls 20 μ s

Porovnáním zde uvedených průběhů s výsledky ostatních použitých metod (impedanční a frekvenčně závislý dělič) je patrné, že se zde nevyskytují shodné rezonanční frekvence. To je způsobeno tím, že toto měření ve své podstatě zkoumá mechanické rezonance (elektrickým pulsem vybudíme mechanickou odezvu, která je převedena zpět na elektrický signál). Ale tyto mechanické rezonance by se měly nějak projevit na impedanční charakteristice, což se nestalo. Navíc tyto naměřené špičky se vyskytují na poměrně vysokých kmitočtech, což neodpovídá mechanickým rezonancím.

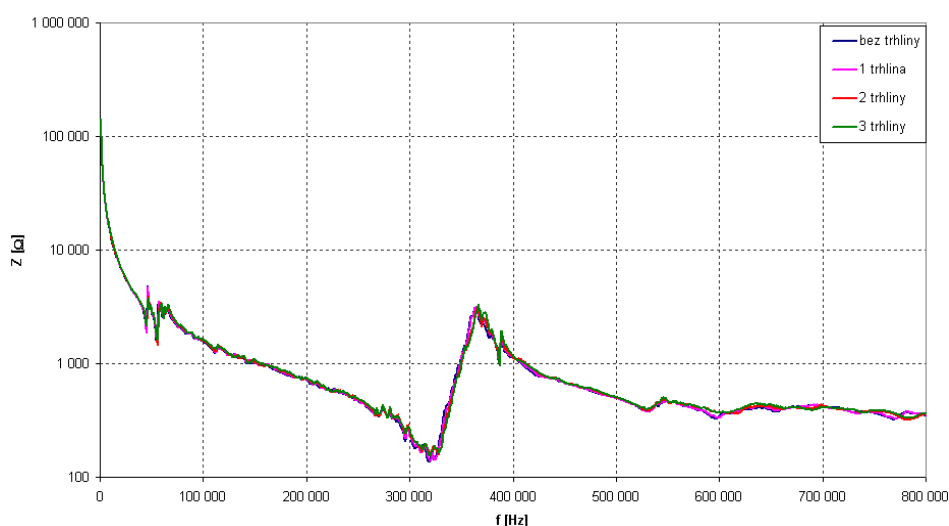
3.2.4 Sledování vlivu rozsahu poškození trhlinami na chování piezokeramiky

V této části je popsáno zkoumání vlivu trhlin, jejich počtu a způsobu (síle) upevnění piezokeramiky na změny v měřených charakteristikách metod uvedených v předchozí kapitole.

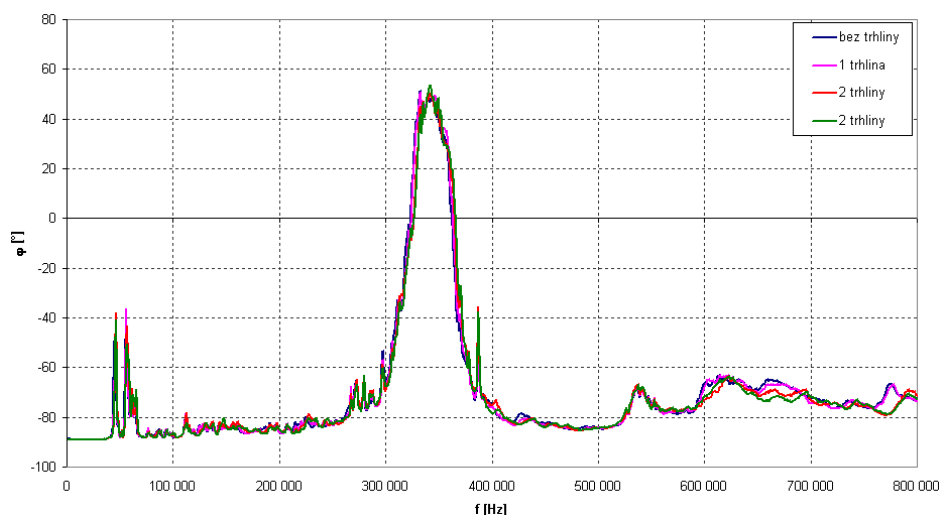
K vytváření trhlin v piezokeramice byl použit hranolek z nástrojové oceli s ostrou hranou. S ohledem na přístrojové možnosti bylo prováděno měření velikosti trhlin jednoduchou optikou. Jako testované vzorky byly použity prstence z piezokeramiky Sonox P502 firmy CeramTec AG používané pro realizaci návrhu ve snímačích klepání. Tyto vzorky byly upevněny na přípravku, který též vychází z podstaty snímačů klepání (tzn. setrvačná hmota na piezoelementu). [46],[54]

3.2.6 Vliv trhlin na impedanční charakteristiku

Měření bylo realizováno dle popisu v kapitole výše. Uvedené charakteristiky jsou pro vzorek umístěný na přípravku a dotažený momentem 5 Nm. Velikost momentu dotažení má vliv na tvar impedanční charakteristiky a bude popsán dále.



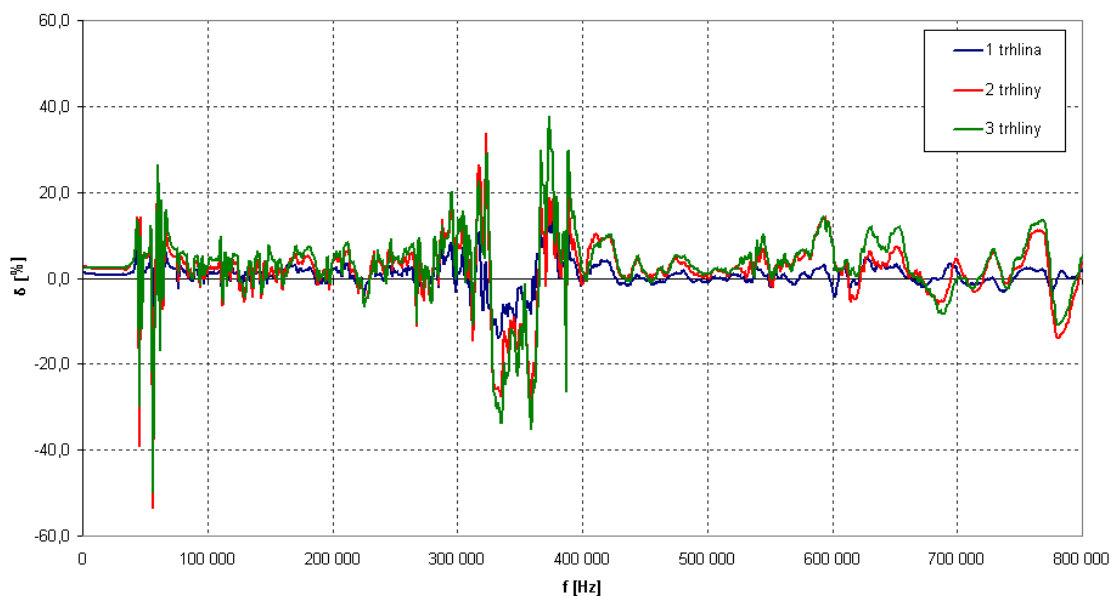
Obrázek 3-8 Závislost modulu impedance na frekvenci pro jednotlivé poškození



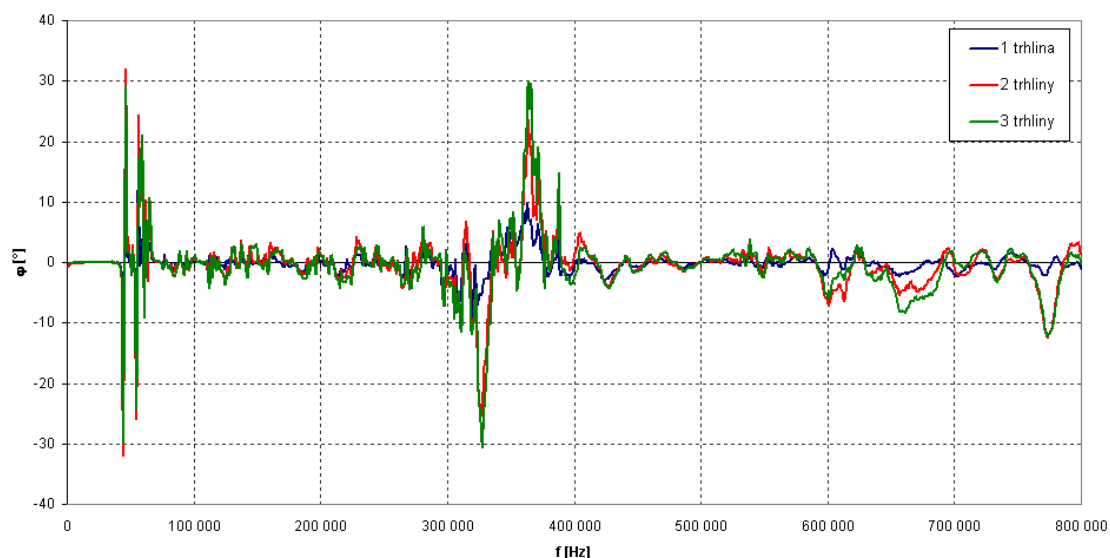
Obrázek 3-9 Závislost fáze impedance na frekvenci pro jednotlivé poškození

Z naměřených charakteristik (obrázky 3-9 a 3-10) není na první pohled patrné, jak jednotlivé trhliny ovlivňují naměřenou charakteristiku, zejména v závislosti modulu impedance nejsou vidět výrazné změny, ale zřejmější jsou charakteristiky, kde jsou porovnány chyby pro jednotlivá poškození, viz obrázky 3-11 a 3-12. Všechny vypočtené chyby jsou vypočteny vzhledem k naměřeným charakteristikám nepoškozeného vzorku.

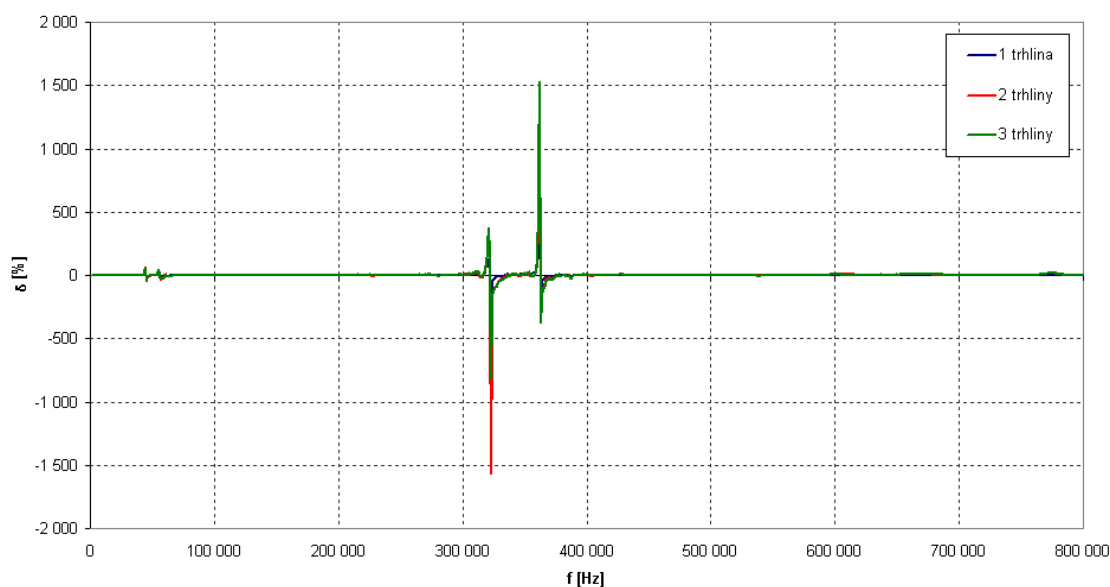
Na obrázku 3-11 je zobrazena závislost relativní chyby impedance na frekvenci. Na první pohled jsou zde patrné odchylky v rezonančních kmitočtech. Ty jsou způsobeny tím, že zde dochází k prudkému nárůstu, nebo poklesu impedance.



Obrázek 3-10 Závislost relativní chyby modulu impedanční charakteristik



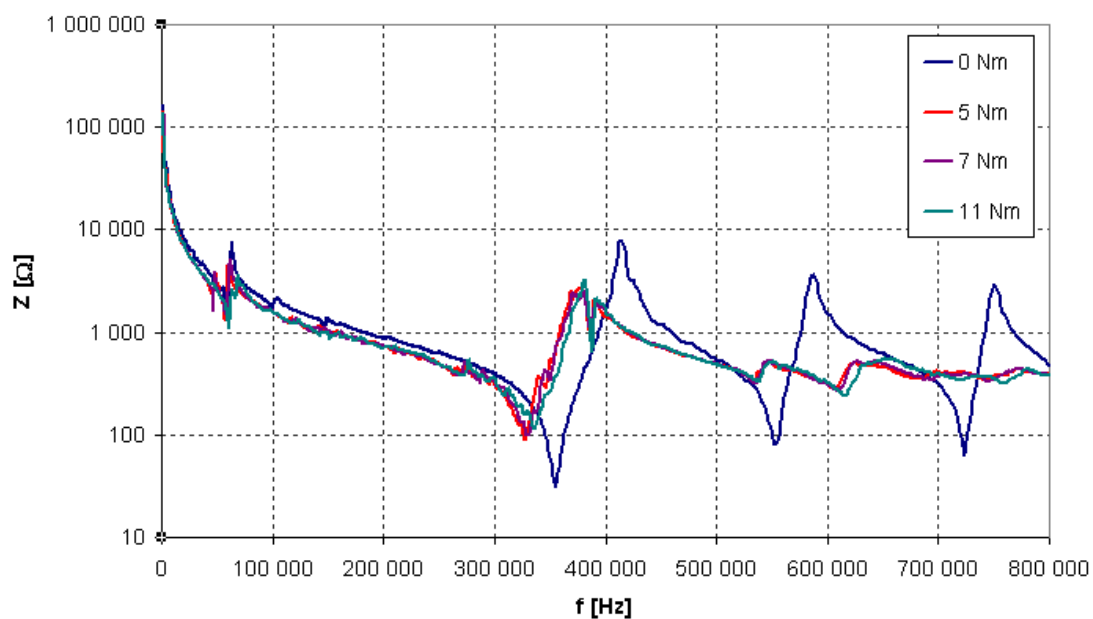
Obrázek 3-11 Závislost absolutní chyby fáze impedanční charakteristiky



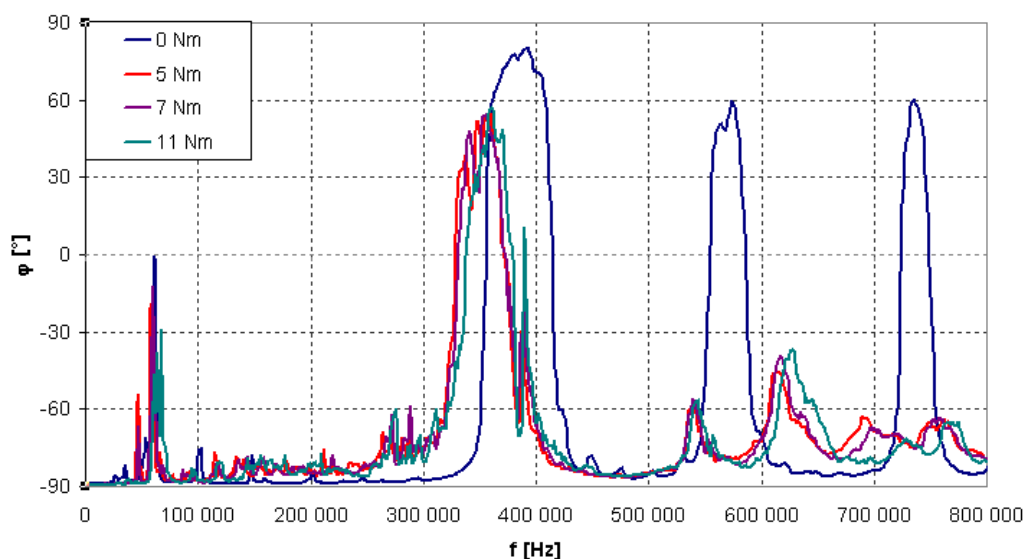
Obrázek 3-12 Závislost relativní chyby fáze impedanční charakteristiky

Jedním z problémů, které vykazuje toto měření, je jeho poměrně špatná opakovatelnost. Zejména při porovnání průběhů fázové charakteristiky v okolí rezonančních vrcholů jsou patrné výrazné odchylky.

Na tvar impedanční charakteristiky má také vliv velikost momentu, kterým je měřící přípravek dotažen. Porovnání je provedeno pro nepoškozený vzorek dotažený různými momenty.



Obrázek 3-13 Závislost impedanční charakteristiky pro dotažení různými momenty

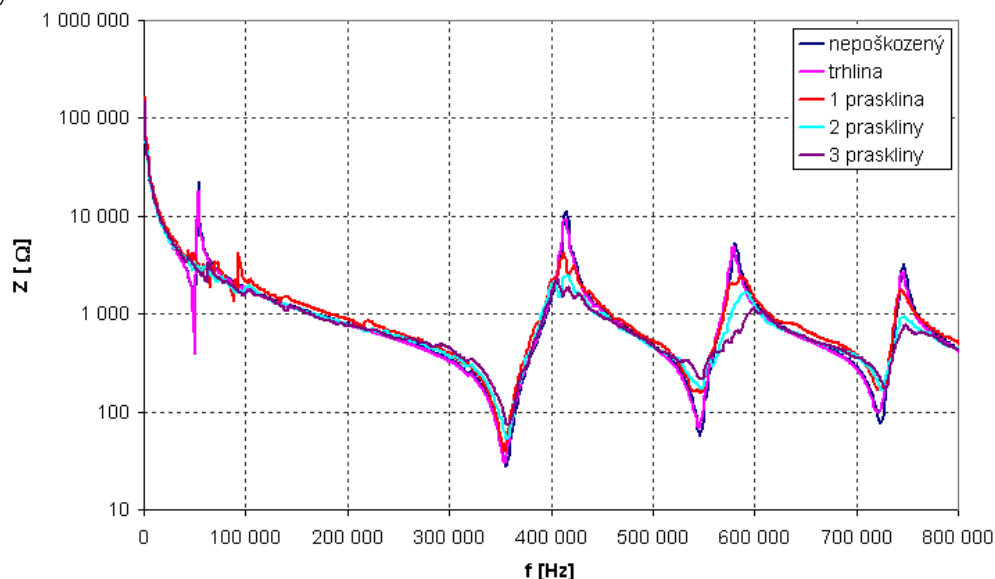


Obrázek 3-14 Závislost fázové charakteristiky pro dotažení různými momenty

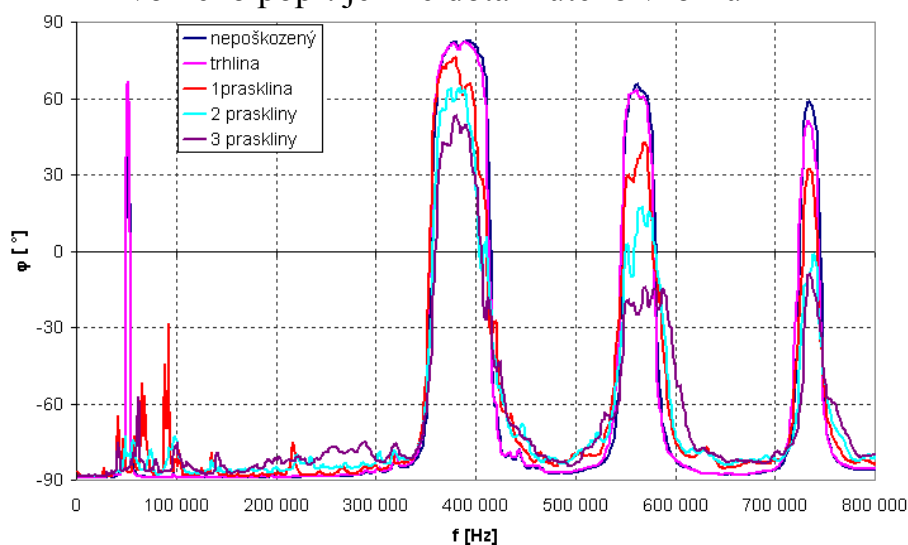
Z naměřených charakteristik je zvlášť patrná změna při dotažení momentem 0 Nm a 5 Nm. To je způsobeno tím, že moment 0 Nm byl realizován volným připojením bez použití měřícího přípravku - viz obrázek 3-14 a 3-15. Z charakteristik je vidět, že vlivem upnutí měřeného prvku do přípravku dochází ke změně velikosti a polohy rezonančních vrcholů. Rovněž průběh není tak hladký a dochází k výskytu dílčích rezonancí. Na druhou stranu je nutné zdůraznit, že měření s použitím přípravku se vyznačuje lepším spojením piezoelementu-měřící elektroda.

Jako zásadní se jeví vliv prasklin (prasklina je skrz celý materiál). Na obrázcích 3-16 a 3-17 je srovnání vlivu trhlin na tvar charakteristiky. Z průběhů je pozorovatelný vliv jednotlivých druhů poškození. První průběh je pro nepoškozený

vzorek, druhý pro poškození drobnou trhlinou. Porovnáním prvních dvou průběhů není patrná výrazná odchylka. Zatímco při prasklině dojde k poklesu a změně impedanční charakteristiky. Zejména při rezonanční frekvenci kolem 50 kHz dochází vytvoření dalších rezonančních módů.

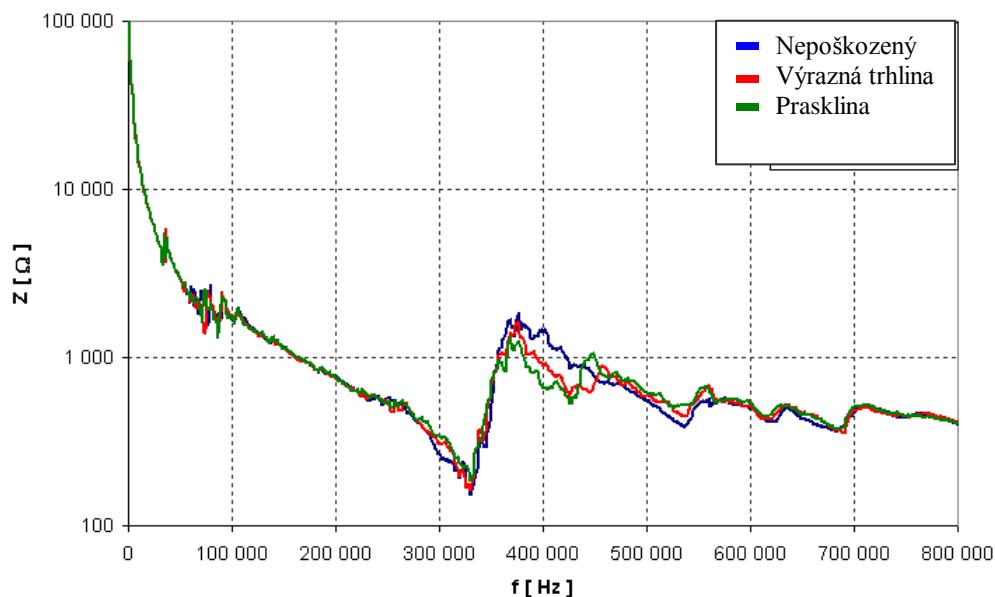


Obrázek 3-15 Porovnání vlivu prasklin na tvar impedanční charakteristiky volného popř. jemně dotáhnutého vzorku

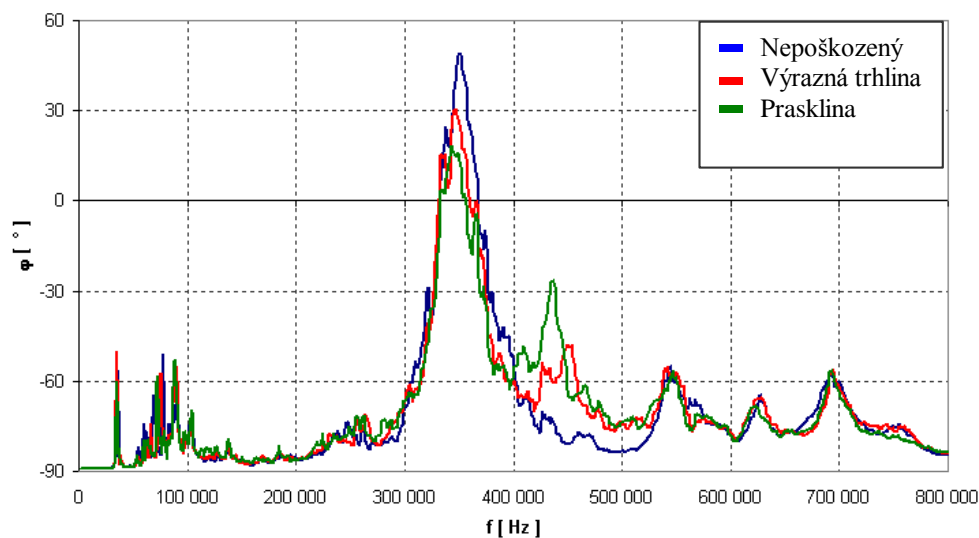


Obrázek 3-16 Porovnání vlivu prasklin na tvar fázové charakteristiky volného popř. jemně dotáhnutého vzorku

Obrázky 3-18 a 3-19 ukazují vliv prasklin na piezokeramický prvek upevněný v přípravku dotáhnutém momentem 7 Nm. Zde je porovnáván vliv praskliny a výrazné trhliny, neboť drobné trhlinky nemají výrazný vliv na měřenou charakteristiku. Tedy i z těchto průběhů je patrný vliv prasklin na naměřené charakteristiky, ovšem není tak znatelný jako v případě volného prvku (nebyl upnut na přípravku). Zde je zajímavý nárůst impedance i fáze v oblasti kolem 450 kHz.



Obrázek 3-17 Porovnání vlivu prasklin na tvar impedanční charakteristiky vzorku dotáhnutého momentem 7 Nm

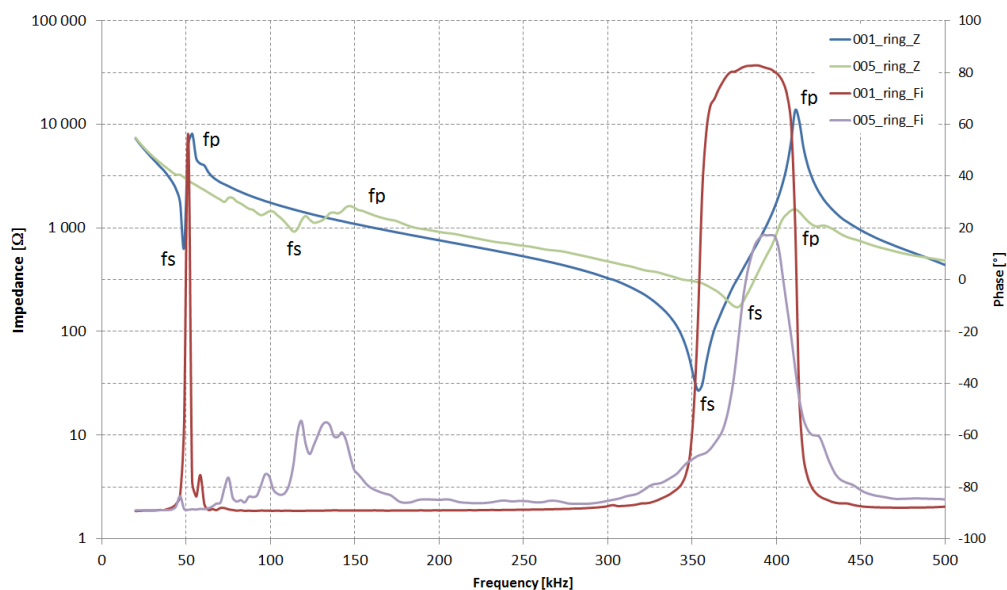


Obrázek 3-18 Porovnání vlivu prasklin na tvar fázové charakteristiky vzorku dotáhnutého momentem 7 Nm

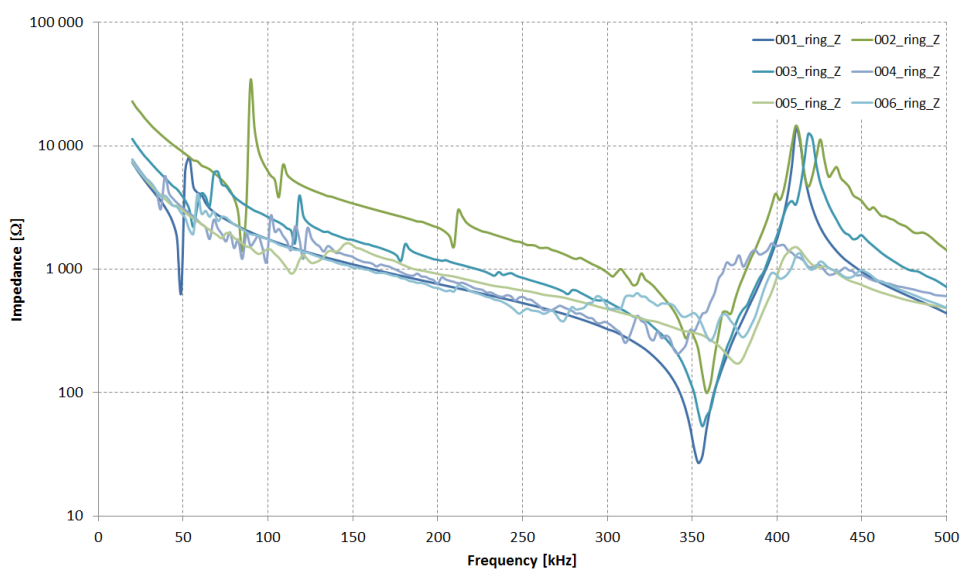
Výsledky měření impedanční a fázové charakteristiky pomocí impedančního analyzátoru Agilent 4294A a měřicích kleští Agilent 16334A jsou na obrázcích 3-20, 3-21, 3-22, legenda k těmto naměřeným charakteristikám je následující:

- 001_ring – měření zdravého prstence
- 002_ring – měření prasklého prstence, menší části asi 1/3
- 003_ring – měření prasklého prstence, větší části asi 2/3
- 004_ring – měření snímače bez krytu, tedy pouze holé konstrukce, kde byl uložen prasklý a silně poškozený prstenec
- 005_ring – měření zdravého z venkovní části nepoškozeného snímače

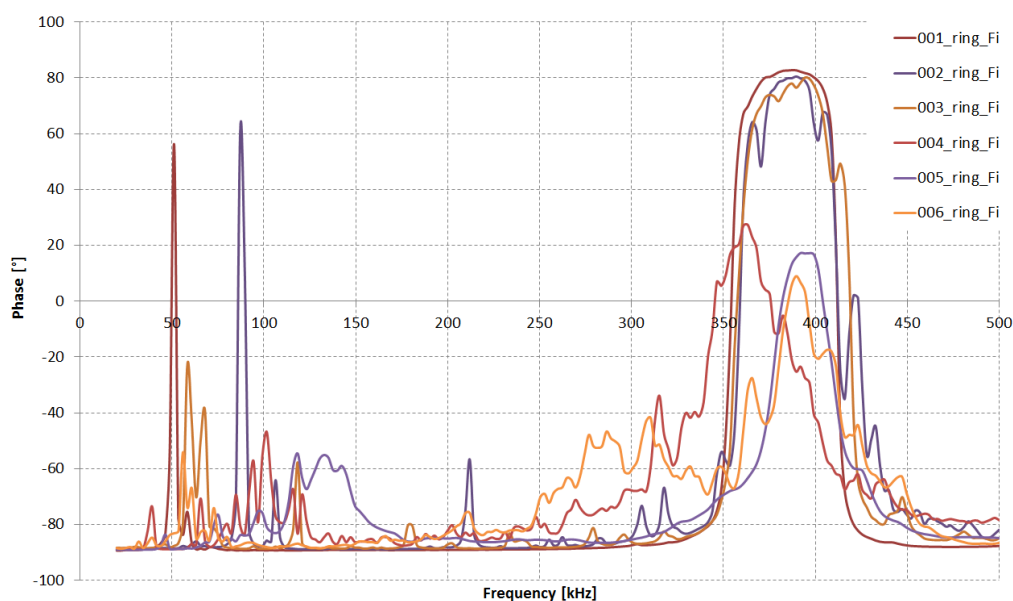
- 006_ring – měření snímače bez krytu, ve kterém byl uložen disk 001_ring, tedy zdravý disk bez zjevných poškození



Obrázek 3-19 Impedanční a fázová charakteristika PZT keramiky Sonox P502, pro prstenec 001_ring a pro snímač 005_ring – zobrazení vlivu utlumení impedanční charakteristiky po vložení prstence do snímače



Obrázek 3-20 Impedanční charakteristika PZT keramiky Sonox P502, pro všechny měření popsané v legendě

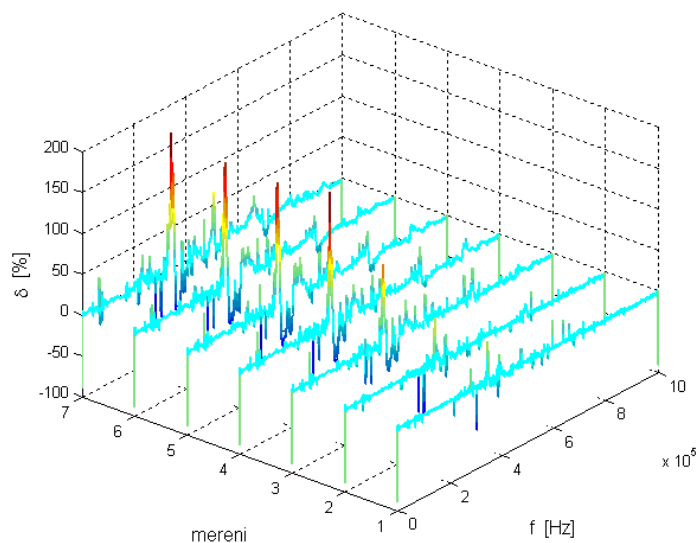


Obrázek 3-21 Fázová charakteristika PZT keramiky Sonox P502, pro všechny měření popsané v legendě

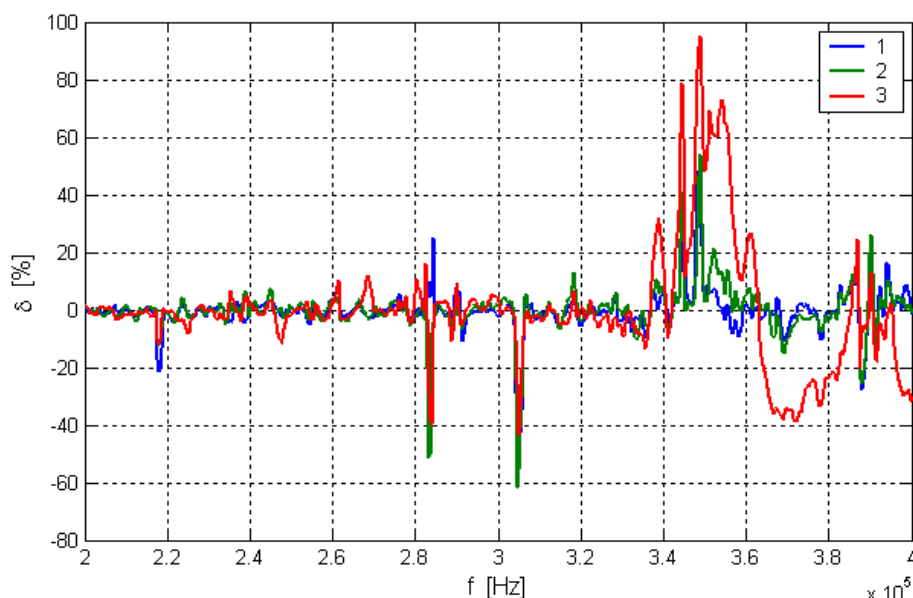
Z naměřených průběhů je vidět, že po uložení keramiky do snímače je průběh impedanční charakteristiky významně utlumen a to v okolí radiálních kmitů i tloušťkových kmitů. Rezonanční i antirezonanční frekvenci je možné určit jak z impedanční, tak i fázové charakteristiky proto jsou zde zobrazeny oba případy.

3.2.7 Vliv trhlin na měření pomocí frekvenčního analyzátoru

Měření bylo realizováno dle popisu v kapitole výše. Na obrázku 3-23 jsou uvedeny jednotlivé naměřené průběhy pro jednotlivá poškození. Na obrázku 3-24 je pak uvedena vypočtená odchylka od průběhu pro nepoškozený prvek.



Obrázek 3-22 Vývoj relativní chyby při způsobeném poškození



Obrázek 3-23 Srovnání relativní chyby vlivu trhlin (počet trhlin 1-3) ve frekvenčním pásmu 200 kHz - 400 kHz

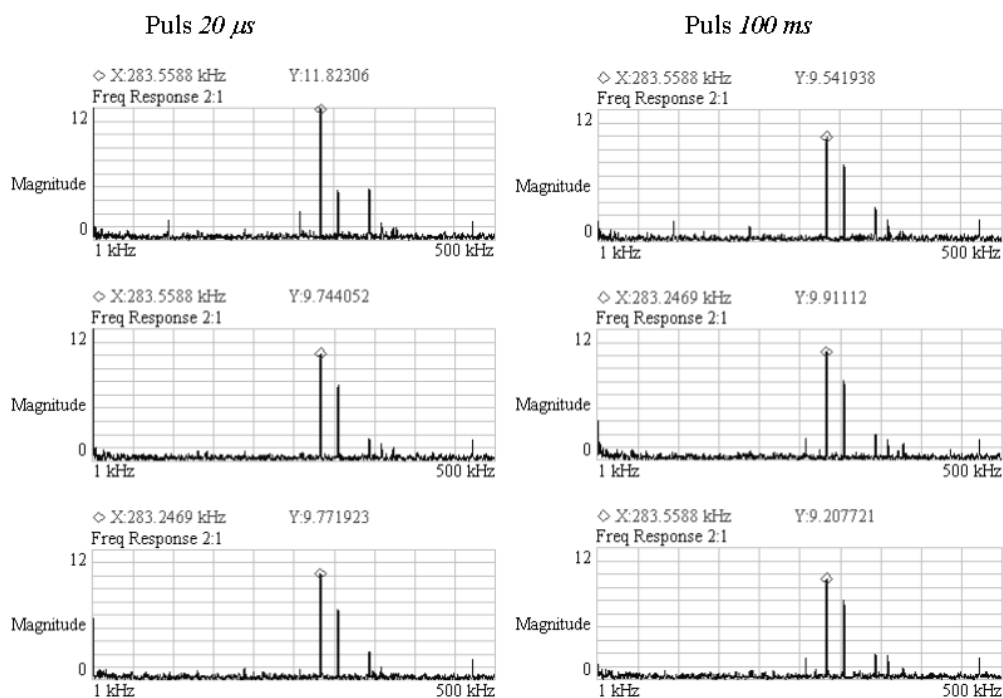
Na obrázku 3-24 je vidět, jak se mění charakteristika v okolí rezonanční frekvence piezoelementu vlivem poškození. Popis průběhů v grafu je následující:

- Průběh 1 je chyba mezi dvěma měřeními nepoškozeného prvku (opakovatelnost měření).
- Průběh 2 představuje drobné poškození.
- Průběh 3 výraznější poškození.

Na těchto uvedených charakteristikách je pozorovatelná změna průběhu s rostoucím poškozením. Zejména výraznější poškození představuje podstatnou změnu naměřeného průběhu. Vliv drobných trhlin nelze určit.

3.2.8 Vliv trhlin při měření metodou elektrického pulsu

Ověřování probíhalo dle popisu metody v kapitole výše. Porovnání vlivu trhlin na naměřenou charakteristiku je na obrázku 3-25. Charakteristiky v prvním řádku představují nepoškozený měřený prvek. V druhém řádku jsou průběhy po poškození drobnou trhlínou a v posledním případě se jedná o měření, při němž došlo k výraznému poškození měřeného piezoelementu. Z porovnání všech naměřených průběhů nelze zjistit souvislost mezi poškozením a naměřenou charakteristikou.



Obrázek 3-24 Vliv trhlin na měření pomocí elektrického pulsu

3.3 SHRnutí POUŽITÝCH METOD A DOPORUČENÍ

Z popsaných metod, které je možné použít pro bezdemontážní diagnostiku poruch piezokeramiky piezoelektrického snímače, se jeví nejzajímavěji metody využívající měření pomocí elektrického pulsu a měření impedanční charakteristiky. Všechna měření probíhala v ustálených laboratorních podmínkách (stejná teplota a hlučnost). Zmíněné metody byly zkoušeny vždy pro sadu vzorků, k dispozici bylo 15 kusů nepoškozených snímačů a v případě testování trhlin bylo zkoušeno vždy 5 kusů stejně porušených vzorků.

3.3.1 Metoda měření impedanční charakteristiky

Jedná se o měření podávající poměrně dobré výsledky, je ale nutné dodržet stále podmínky měření, jelikož velký vliv na měření má například teplota. Kromě vlivu trhlin na impedanční charakteristiku byl zkoumán i vliv momentu dotažení piezokeramiky. Zde byla zjištěna významná závislost, je nezbytné srovnávat pouze snímače stejně připevněné a dotažené. Pro praktické použití této testovací metody je vhodné se zaměřit na oblast rezonančních vrcholů.

3.3.2 Metoda měření pomocí frekvenčního analyzátoru

Průběh naměřených charakteristik se shoduje s metodou impedančních charakteristik, přestože se z počátku ověřování této metody vyskytovala chyba opakovatelnosti. Vliv poškození na naměřené charakteristiky je patrný, a to zejména při výraznějším poškození piezoelementu. Toto měření je velmi rychlé, vyžaduje však poměrně složité přístrojové vybavení (frekvenční analyzátor daného rozsahu). Pro praktické využití této metody platí stejná pravidla jako u měření impedanční charakteristiky.

3.3.3 Metoda měření pomocí elektrického pulsu

Porovnáním naměřených charakteristik se ukazuje, že je možné použít navrhnutou metodu pro testování piezoelektrických snímačů, snímačů klepání. Zkušební postup oproti klasickému testování piezoelektrických snímačů značně sníží dobu testování. Výhody tohoto zkušebního postupu ve srovnání s tradičními budícími metodami lze shrnout takto: Jde čistě o elektrické testování, tj. není třeba vibračního stolku, zesilovače, atd. Testovací impuls je poměrně krátký - v řádu maximálně kolem 100 ms pro jedno měření. Lze použít výpočty pro standartní frekvenční charakteristiky, tedy není třeba žádný postprocesing. Automatizované testování pak může být provedeno různými způsoby. Nejjednodušší způsob je hledat rezonanční frekvenci snímače, která je dobrým ukazatelem pro to, zda je senzor v pořádku, tj. odpovídá specifikaci daného snímače. Další jednoduchou, ale propracovanější metodou může být nastavení a sledování tolerančních křivek a srovnávání, zda-li se frekvenční charakteristika vyskytuje v předpokládaném profilu tolerančních křivek. Toleranční křivky mohou být i vodorovné přímky, pokud frekvenční charakteristika má "dobré" parametry v požadovaném rozsahu. Ale lze aplikovat i pokročilejší metody klasifikace signálu, například neuronové sítě. Další úvahou, jak získat relevantní a použitelnou informaci z časového průběhu odezvy snímače na budicí signál, by mohlo být měření vlastností tlumených kmitů, respektive výpočet logaritmického dekrementu tlumeného kmitavého pohybu.

4 ZÁVĚR

Technická diagnostika se zabývá metodami a prostředky zjišťování stavu objektů. S pokročilými technologiemi a přístupy je aktuální trend k bezdemontážnímu sledování nejen samotných objektů, ale i snímačů, které sledují dané stroje či zařízení. Taková diagnostika musí splnit řadu požadavků. Mezi ně patří rychlost, žádná nebo co nejmenší demontáž diagnostikovaného objektu, přesnost a reprodukovatelnost výsledků z měřených dat v on-line režimu. Proto je věnována pozornost novým diagnostickým metodám a diagnostice vlastních snímačů měřených veličin, jako i měřicím a vyhodnocovacím přístrojům a softwaru.

Pro diagnostiku vibrací spalovacích i vznětových motorů se jako jeden z nejdůležitějších diagnostických signálů využívá signál z klepání motoru. V rámci zkoumání dané problematiky byl vyvinut prototyp snímače klepání a zkoumány metody pro diagnostiku těchto piezoelektrických snímačů vibrací za účelem posoudit vliv poškození piezokeramiky na měřená data. Pro řízení motoru je třeba zajistit, aby naměřená data ze senzorů byla správná. To je zejména problém při poškozeném snímači (např. poškození piezoelektrického materiálu), který sice informace – měřená data poskytuje, ale ty neodpovídají skutečnosti. Zde je nutné si uvědomit důležitost bezdemontážní diagnostiky, neboť sice demontáž a otestování samotného čidla je možná, ale z mnoha důvodů nevhodná a navíc se závada může identifikovat poměrně pozdě od vlastního poškození. Proto cílem práce bylo hledání nových – bezdemontážních metod snímačů vibrací pro ověřování jejich parametrů. Část práce tedy pojednává o vlivu a identifikaci trhlin v piezokeramice ve snímačích klepání. Cílem bylo najít jednoduchou a vhodnou měřicí metodu a ověřit vliv trhlin na naměřené parametry snímače.

Praktickým testováním metod bylo ověřeno, že lze najít metody, kterými lze poškození v piezokeramice odhalit, tedy že poškození piezokeramiky má vliv na naměřené charakteristiky a tím i na přesnost měření piezoelektrických snímačů – snímačů klepání. Jako nejvhodnější diagnostická metoda se jeví metoda měření pomocí elektrického pulsu, a měření impedančních parametrů - charakteristik

a měření pomocí frekvenčního analyzátoru. Ostatní použité metody neměly dostatečně vypovídající charakter. Byl také řešen vliv poškození piezokeramiky trhlinami a prasklinami na naměřené charakteristiky. Závěr práce ukazuje, že přestože existují způsoby, jak lze odhalit poruchu piezoelektrických snímačů, myšlenka bezdemontážního testování piezoelektrických snímačů naráží stále na poměrně náročná měřicí vybavení, které nelze jednoduše aplikovat například v automobilu pro in situ testování snímače klepání. Pozornost by ale v tomto případě mohla například být upřena směrem k návrhu testovacího zařízení, kdy by piezoelektrický snímač byl zapojen do oscilátoru, s frekvencí výstupního signálu určenou testovaným piezoelementem.

REFERENCES

- [1] GAUTSCHI, G. *Piezoelectric Sensorics*, New York, Springer 2002, ISBN 3-540-42259-5.
- [2] BAZHENOV A. A., Yarovikov V.I. *Design of Knock Sensors and Piezoaccelerometers*, Arlington, Futurepast 2002, ISBN 0-9710464-0-9.
- [3] BOSCH. *Automotive Handbook*, Robert Bosch GmbH, ISBN 1-65091-372-X.
- [4] SERRIDGE, M., LICHT, R.T. *Piezoelectric Accelerometers and Vibration Preamplifiers*, Brüel&Kjaer Handbook, Brüel&Kjaer, 1986.
- [5] HERLUFSEN, H. Dual channel FFT analysis, *Brüel&Kjær Technical Review*, No.1 & 2, 1984.
- [6] BROCH, J.T. *Mechanical Vibrations and Shock Measurements*, Brüel&Kjaer Handbook, 1994, K. Larsen & Son., Denmark, 1984. ISBN 87 87355 361.
- [7] ĎAĎO, S., KREIDL, M. *Senzory a měřicí obvody*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1996. ISBN 80-01-01500-125X.
- [8] ERHART, J. *Základy piezoelektriny pro aplikace jeho aplikace*. Učební texty k semináři. Dostupné z http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura_06_1112.pdf.
- [9] VDOLEČEK, F. *Spolehlivost a technická diagnostika*. FSI VUT Brno, 2002.
- [10] TŮMA, J. *Zpracování signálů získaných z mechanických systémů užitím FFT*. Praha: Sdělovací technika, 1997. ISBN 80-901936-1-7.
- [11] PLATIL, A. – RIPKA, P. *Senzory a převodníky: Laboratorní cvičení*. Vydavatelství ČVUT, 2004, ISBN 80-01-02873-9.
- [12] HIRŠL, J., ČERNOHLÁVEK, D. *Keramická piezoelektrika*. Tesla, Praha 1970.
- [13] BOSCH. *Bosch Diesel Fuel-Injection Systems Unit Injector System and Unit Pump System*. Robert Bosch GmbH, 2007. ISBN 978-0-8376-1550-9.
- [14] PETRŽÍLKA, V. *Piezoelektrina I*. Přírodovědecké vydavatelství, Praha, 1951.
- [15] GADE, S., MATZEN, S., AND HERLUFSEN, H. *QC Test for Knock Sensors*. In *Technical Review*, No.1, 1997.
- [16] ZHANG, X.P., GALEA, S.Y. L., MAI, Y.W. *Characterization of the effects of applied electric fields on fracture toughness and cyclic electric field induced fatigue crack growth for piezoceramic PIC 151*. *Smart Material and Structures*. Vol. 13. No. 1 Dostupné z <http://ej.iop.org> >.

- [17] MOOK, G., POHL, J., MICHEL, F. *Non-destructive characterization of smart CFRP structures. Smart Material and Structures. Vol. 12* No. 6. Dostupné z <<http://ej.iop.org>>.
- [18] POHL, J., HEROLD, S., MOOK, G., MICHEL, F. *Damage detection in smart CFRP composites using impedance spectroscopy. Smart Material and Structures. Vol. 10* No. 4. Dostupné z <<http://ej.iop.org>>.
- [19] ČSN ISO 16063-11. *Primární kalibrace vibracemi pomocí laserové interferometrie*. 2001.
- [20] ČSN ISO 16063-21. *Kalibrace vibracemi porovnáním s referenčním snímačem*. 2004.
- [21] APC Int. *Piezoelectric ceramics: Principles and applications*, ISBN 0-97-18744-0-9.
- [22] MENTLÍK, V., PIHERA, J., POLANSKÝ, R., PROSR, P., TRNKA P. *Diagnostika elektrických zařízení*. 1. vydání. Praha: BEN – technická literatura, 2008. 439 s. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [23] LIŠKA, J. *Zpracování signálů pro diagnostiku a jeho aplikace*. Učební texty k semináři. Dostupné z <http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura_08_1012.pdf>.
- [24] CARSTENS-BEHRENS, S., BÖHME, J. F. *Applying Time-Frequency Methods to Pressure and Structure-borne Sound for Combustion Diagnosis*. ISSPA 2001, pp.256-259 Kuala Lumpur, Malaysia, 2001.
- [25] COHEN, L. *Time-Frequency Analysis*. Prentice Hall, New Jersey, 1995, ISBN 0-13-594532-1.
- [26] HUANG, N. E. *The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis*. Proc. Roy. Soc. London, 454, 903-993, 1998.
- [27] HUANG, N. E. *Computing Instantaneous Frequency by Normalizing Hilbert Transform*. U.S. Pat. No. 6,901,353, 2005.
- [28] LIŠKA, J., JANEČEK, E. *Time-Frequency Representation of Instantaneous Frequency Using a Kalman Filter*. ICINCO 2007, Angers, 2007.
- [29] LIŠKA, J., KODET, P., JANEČEK, E. *Source Location in Loose Parts Monitoring Using Time-Frequency Analysis*. Proceedings of 9th International Carpathian Control Conference (ICCC' 2008), Sinaia, Romania, 2008.
- [30] LIŠKA, J., Janeček, E. *Time-Frequency Representation of Signals Using Kalman Filter*. Robotics, Automation and Control, I-Tech Education and Publishing, Wien, Austria, 2008.
- [31] Marple, S.L.: *Digital Spectral Analysis*. Prentice Hall, New Jersey, 1987

- [32] RILLING, G., FLANDRIN, P., GONCALVES, P. *On Empirical Mode Decomposition and its Algorithms*. IEEE-EURASIP workshop on nonlinear signal and image processing NSIP-03, Grado, 2003.
- [33] VASEGHI, S.V. *Advanced Digital Signal Processing and Noise Reduction*. John Wiley and Sons, Chichester, 2006. ISBN 0-470-09494-X.
- [34] GUAN, M., LIAO W.-H. *Studies on the Circuit Models of Piezoelectric Ceramics*, 2004. Dostupné z <<http://ej.iop.org>>
- [35] CREDE C. M., HARRIS, Ch. E. *Shock and Vibration Handbook*, McGraw Hill, Inc., 1976
- [36] WISMER, N. J., KONSTANTIN-HANSEN, H. *Mounted Resonance Measurements using Type 2525*. Application Note, BO0413, Brüel & Kjær, 1994.
- [37] BRÜEL&KJÆR *In Situ Verification of Accelerometer Function And Mounting*. In *Technical Review*, 1996.
- [38] KREIDL, M. *Diagnostické systémy*. Praha: Vydavatelství ČVUT Praha, 2001, ISBN 80-01-02349-4.
- [39] LIŠKA, M., SLÁDEK, Z. *Spolehlivost a technická diagnostika*. Skriptum VUT Brno, ES VUT 1989. 146. ISBN 80-214-1047-7.
- [40] MYKISKA, A. *Spolehlivost technických systémů*. Skriptum ČVUT Praha, Vydavatelství ČVUT 2000. ISBN 80-01-02079-7.
- [41] DVOŘÁČEK, D. *Diagnostika mikrotrhlin v piezokeramice*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2006. 72 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Stanislav Klusáček.
- [42] EUROPEAN STANDARD, EN 50324-2: 2002, *Piezoelectric properties of ceramic materials and components, Part 2: Methods of measurement – Low power*, CENELEC European Committee for Electrotechnical Standardization, 2002.
- [43] Allan, D. W., “Statistics of atomic frequency standards” *Proceedings of the IEEE*, vol. 54, no. 2, pp. 221–230, Feb. 1966.
- [44] IEEE STANDARD NO.177, *IEEE Standard Definitions and Methods of Measurement for Piezoelectric Vibrators*, Institute of Electrical and Electronic Engineers Inc., New York, NY 10017, 1966, pages 20.
- [45] *Materials for sensors*. Dostupné z <http://www.ceramtec.com/files/mf_materials-sensors.pdf>. [cit. 2012-03-01].

AUTHOR'S CURRICULUM VITAE

Osobní údaje:

| | |
|--------------------|------------------------------|
| Příjmení / Jméno | Klusáček Stanislav |
| Adresa | Körnerova 781/8, 602 00 Brno |
| Telefon | +420 604 449 255 |
| E-mail | klusacek@feec.vutbr.cz |
| Státní příslušnost | Česká Republika |
| Datum narození | 10. června 1977 |

Vzdělání:

| | |
|----------------------|--|
| Období | 2003 → doposud |
| Dosažená kvalifikace | Soustavná příprava na doktorském studiu (Ph.D.) v oboru Kybernetika, automatizace a měření. |
| Název organizace | Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně, dizertační práce na téma „Metody bezdemontážní diagnostiky“. |
| Období | 1995-2001 |
| Dosažená kvalifikace | Inženýr (Ing.) v oboru Kybernetika, automatizace a měření. |
| Název organizace | Fakulta elektrotechniky a informatiky, Vysoké učení technické v Brně, diplomová práce na téma „Multianalyzátor PULSE“. |

Pracovní zkušenosti:

| | |
|----------------------------|--|
| Období | 2006 → doposud |
| Povolání / funkce | <p>– asistent, výuka laboratorních cvičení v předmětech „Měření fyzikálních veličin“, „Snímače neelektrických veličin“, „Vláknová optika v automatizaci“, výuka tutoriálů a laboratorních cvičení kurzu „Inteligentní a polovodičové snímače“, vedení bakalářských a diplomových prací (doposud cca 50 prací)</p> <p>– výzkumný pracovník, člen řešitelského týmu projektu 6. rámcového programu EU (2006–2009)</p> <p>– vědecká a publikační činnost, řešení výzkumných projektů a projektů spolupráce s průmyslem – viz níže výčet vybraných projektů.</p> |
| Název/jméno zaměstnavatele | Ústav automatizace a měřicí techniky, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně |

| | |
|----------------------------|--|
| Období | 2011 → doposud |
| Povolání / funkce | – výzkumný pracovník (junior researcher) |
| Název/jméno zaměstnavatele | CEITEC VUT – Středoevropský technologický institut. |
| Období | 2001 – 2005 |
| Povolání / funkce | technický a výzkumný pracovník, výuka v předmětech „Měření fyzikálních veličin“, „Snímače neelektrických veličin“, „Vláknová optika v automatizaci“, vedení semestrálních, bakalářských a diplomových prací – vědecká a publikační činnost, řešení výzkumných projektů a projektů spolupráce s průmyslem. |
| Název/jméno zaměstnavatele | Ústav automatizace a měřicí techniky, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně. |

Znalosti, odborné kvalifikace, vedení / řešení vybraných projektů:

| | |
|---|---|
| Jazykové znalosti | angličtina – aktivně |
| Znalosti a zkušenosti v oboru | – návrh a kalibrace snímačů vibrací – snímače a měření elektrických a neelektrických veličin – měřicí a telemetrické systémy, analýza a zpracování dat – technická diagnostika |
| Vedení projektů a účast na vybraných projektech | – Grant Specifického vysokoškolského výzkumu – Podpora výzkumu moderních metod a prostředků v automatizaci, 2010, 2011, 2012 – zodpovědný řešitel. – Grant FRVŠ č. 2130 – Inovace předmětu Inteligentní a polovodičové senzory, 2012 – zodpovědný řešitel. – Projekt OPVK oblast 2.3: Centrum pro rozvoj výzkumu pokročilých řídicích a senzorických technologií, 2010, 2011 – Grant EU – CREDO – Cabin Noise Reduction by Experimental and Numerical Design Optimization. – Grant FRVŠ č. 2228 – Inovace předmětu Inteligentní a polovodičové senzory, 2009 – zodpovědný řešitel. – Grant FRVŠ č. 1538 – Nová náplň laboratorní výuky předmětu Optoelektronické snímače, 2006 – řešitel. – Řešitel několika hospodářských smluv s průmyslem (ABB, s.r.o., TVD – Technická výroba, a.s., Spectris Praha s.r.o., ViDiTech spol. s r.o.). |

ABSTRACT

The main objective of the presented thesis is to contribute to the development of diagnostic methods for piezoelectric sensor testing. The thesis describes the methods for piezoelectric sensors microcracks identification and diagnostics. The core of the thesis presents the development of a knock sensor prototype, design of suitable methods for the knock sensors diagnosis and evaluation of developed methods with focus on detection of microcracks in the sensor piezoceramic. The last part of the thesis deals with the influence of cracks and splits on the measured data from the piezoelectric transducer. The presented methods are focusing on impedance measurements and sensors frequency response measurements. Known properties of used piezoelectric material as an information source for measurement and diagnosis are provided. The main result of the work is the evaluation of the methods developed for the piezoelectric sensors self-diagnosis.

ABSTRAKT

Základním cílem této disertační práce je přispění k rozvoji diagnostických metod testování piezoelektrického senzoru. Práce popisuje identifikační a diagnostické metody mikrotrhlin v piezoelektrických senzorech. Hlavní náplní disertační práce je kromě vývoje prototypu snímače klepání, nalezení vhodných metod pro diagnostiku snímače klepání a dále prověření metod pro odhalení trhlin nebo prasklin v piezokeramice snímače. Poslední část práce se zabývá vlivem mikrotrhlin v piezokeramice na měřená data z piezoelektrického snímače. Metody, jimiž se práce zejména zabývá, jsou měření impedance a různé metody měření frekvenčních charakteristik snímače, které známé vlastnosti piezoelektrického materiálu využily jako informačního zdroje pro měření a diagnostiku. Za hlavní výsledek práce lze považovat nalezení a prověření způsobů, které je možno použít pro vlastní diagnostiku piezoelektrických senzorů.